

# АВТОНОМНЫЙ СПИРАЛЬНО-ДИСКОВЫЙ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПИТАНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

## AUTONOMOUS HELICAL-DISC MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR POWERED BY PERMANENT MAGNET

*М. В. Климашов, П. В. Королев, А. С. Пикарь, В. Д. Селемир, Д. А. Толшмяков*  
*M. V. Klimashov, P. V. Korolev, A. S. Pikar, V. D. Selemir, D. A. Tolshmyakov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Доклад посвящен разработке и испытанию модели спирально-дискового магнитокумулятивного генератора (СДМКГ) с питанием от постоянных магнитов, изготовленных из сплава неодим-железо-бор с остаточной намагниченностью 1,32 Тл. Простой в изготовлении генератор при своих достаточно компактных размерах позволит получать в индуктивной нагрузке до 200 Дж энергии. Приведены результаты численного расчета и оптимизации конструкции СДМКГ и магнитной системы. Так же описан эксперимент, где СДМКГ питался от конденсаторной батареи емкостью 10 мкФ и напряжением 1 кВ.

This report is devoted to development and testing a model of helical-disk magneto-cumulative generator (HDMCG) powered from permanent magnets. The magnets are made of neodymium-iron-boron alloy and have residual magnetization of 1,32 T. This simple, compact generator will allow obtaining of up to 200 J in a load. Results of numerical calculation and optimization of HDMCG design and magnetic system are presented. The experiment with HDMCG powered from a capacitor battery of 10  $\mu$ F and voltage of 1 kV is described.

Как правило, для питания магнитокумулятивного генератора (МКГ) используется конденсаторная батарея, заряжаемая от стационарной электрической сети через высоковольтные выпрямительные устройства. Но для некоторых областей применения МКГ полезно использование автономного источника питания.

Достаточно простой и перспективной представляется схема магнитокумулятивного генератора на постоянных магнитах. Применение постоянных магнитов для создания начального магнитного поля позволяет исключить время подготовки магнитокумулятивного генератора к работе. В этом случае также полностью отпадает необходимость в батарее конденсаторов с различными зарядными и коммутирующими устройствами.

Ранее трудности в создании устройств на постоянных магнитах были связаны с малой ( $\approx 10^3$  Э) напряженностью магнитного поля и низкой плотностью магнитной энергии ( $\approx 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>). Поэтому их использование требовало реализации высоких коэффициентов усиления энергии от МКГ. Сейчас же с появлением более сильных постоянных магнитов с остаточной намагниченностью более 1 Тл эта проблема отошла на задний план. Появилась

возможность сконструировать компактный автономный магнитокумулятивный генератор на постоянных магнитах.

Одной из основных проблем в МКГ на постоянных магнитах является размещение магнитной системы. Если брать классический спиральный коаксиальный генератор, то размещение магнитов внутри спирали генератора будет препятствовать равномерному расширению трубы и вытеснению магнитного поля в нагрузку. При размещении магнитов поверх спирали генератора, проблема состоит в том, чтобы не дать создаваемому ими магнитному потоку рассеяться вне области охваченной спиралью. Необходимо сконструировать и расположить магнитную систему так, чтобы магнитный поток, создаваемый ею, находился в значительной степени под спиралью в области сжатия генератора. Так в экспериментах с ВМГ-50 [1] использовалась магнитная система квадратного сечения из плоских магнитов, что конечно приводило к неравномерности магнитного поля внутри спирали и снижению начальной энергии поля, которая составила всего 1,2 Дж. Задача значительно упрощается в спирально-дисковом магнитокумулятивном генераторе (СДМКГ), где

спираль плоская [2]. Здесь магнитная система из кольцевых магнитов с продольной намагниченностью может быть легко расположена над плоской спиралью. Проблема состоит в изготовлении плоской профилированной спирали.

Эти проблемы были решены в разработанной модели СДМКГ на постоянных магнитах [3] (рис. 1), где для изготовления спирали было предложено воспользоваться технологией изготовления печатных плат. Тем самым будет достигнута нужная геометрия спирали, легкость изготовления и оптимальное размещение магнитной системы.

Генератор состоит из двух одинаковых частей, представляющих собой отдельные генераторы соединенных вместе и разделенных слоем ВВ 5. Каждая часть содержит в себе магнитную систему 1, полость сжатия магнитного потока 4, выходной согласующий трансформатор 3 и систему подрыва 2. Магнитная система представляет собой магнитопровод из магнитомягкого материала с расположенными на нем постоянными магнитами из сплава NeFeV. Полость сжатия магнитного потока ограничивается корпусом генератора, лайнером 7 и плоской спиралью 6.

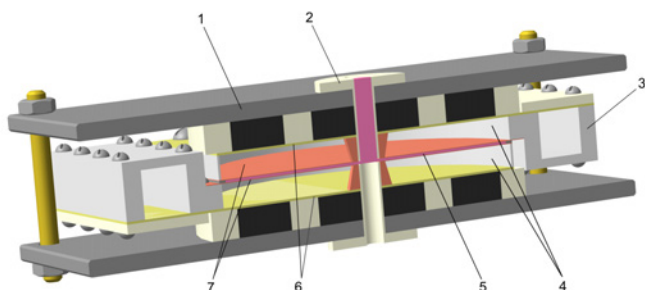


Рис. 1. Модель СДМКГ на постоянных магнитах в разрезе: 1 – магнитная система; 2 – система подрыва; 3 – согласующий трансформатор; 4 – полость сжатия магнитного потока; 5 – ВВ; 6 – плоская спираль; 7 – лайнер

Для оптимизации магнитной системы были проведены численные расчеты. Моделью магнитной системы была выбрана двумерная осесимметричная линейная задача магнитостатики, где численно решалось уравнение в частных производных для векторного магнитного потенциала  $A_{phi}$ :

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A_{phi} - M) = 0,$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $M$  – намагниченность.

Остаточная намагниченность используемых магнитов равняется 1,32 Тл. В спирально-дисковом генераторе сжатие магнитного поля происходит в направлении от центра по радиусу, поэтому оптимизируемым параметром магнитной

системы являлась радиальная компонента магнитной индукции  $B_r$ .

Результаты расчета оптимизированной магнитной системы приведены на рис. 2. Расчетное распределение  $B_r$  показано на графике цветом. Эквипотенциалами показано распределение магнитного потенциала  $A_{phi}$ , стрелками – вектор магнитной индукции.

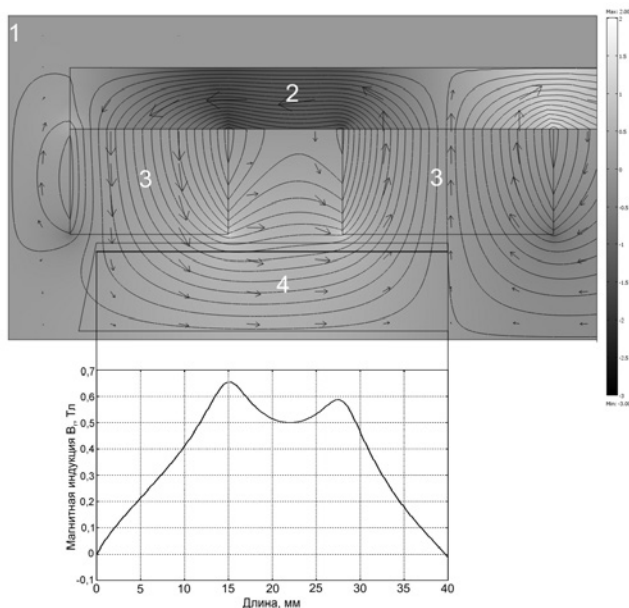


Рис. 2. Расчетное магнитное поле магнитной системы СДМКГ и расчетное распределение радиальной компоненты магнитной индукции  $B_r$  под спиралью. 1 – ось генератора, 2 – магнитопровод, 3 – магниты, 4 – полость сжатия генератора

Геометрия магнитной системы подбиралась таким образом, чтобы радиальная компонента магнитной индукции  $B_r$  была наибольшей в полости сжатия генератора. Особенно ближе к центру, где число витков спирали генератора наибольшее, и захватываемый магнитный поток тоже больше.

Так как в генераторе работает радиальная компонента магнитного поля  $B_r$ , энергия начального магнитного поля рассчитывалась по формуле:

$$W = \frac{1}{8\pi} \int \frac{1}{\mu} B_r^2 dV,$$

где  $V$  – объем полости сжатия генератора.

Энергия магнитного поля рассчитывалась не во всем объеме полости сжатия генератора, а в ближней к центру части объема, где вектор  $B_r$  направлен в одну сторону. Число витков спирали уменьшается от центра к периферии, поэтому захватываемый поток на периферии будет незначительным и частью объема, где  $B_r$  направлена в противоположную сторону, можно пренебречь.

Таким образом, расчетная энергия начального магнитного поля в полости сжатия составила 5 Дж.

Далее проводился расчет работы самого генератора [4] с выходным трансформатором на индуктивную нагрузку 10,2 мкГн, при энергии начального магнитного поля в генераторе 5 Дж. Коэффициент трансформации 1:60. На рис. 3 показан ток генератора. На рисунке 4 показан ток в индуктивной нагрузке. Энергия в нагрузке составляет 227 Дж, и коэффициент усиления генератора по энергии равняется 45.

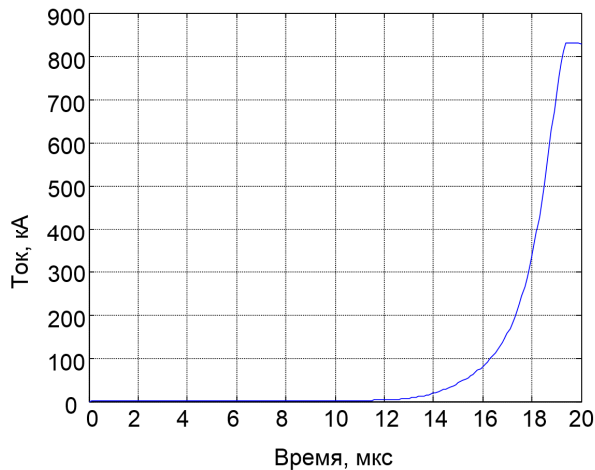


Рис. 3. Расчетный ток в генераторе

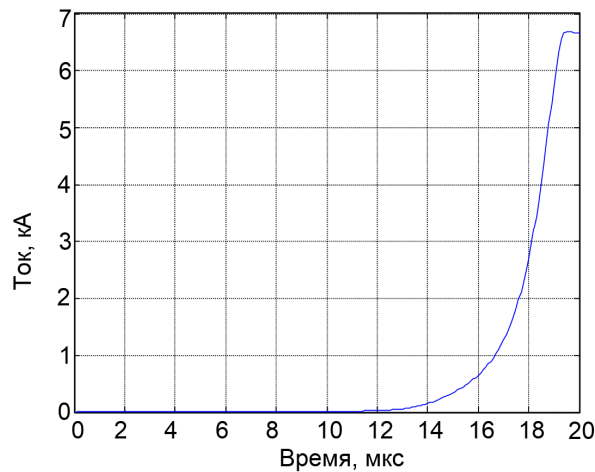


Рис. 4. Расчетный ток в нагрузке

Была изготовлена конструкция и проведен взрывной эксперимент по отработке газодинамики и систем синхронизации спирально-дискового магнитокумулятивного генератора. На рис. 5 показан внешний вид СДМКГ с индуктивными нагрузками. Эксперимент проводился без магнитов.

Питание генератора напряжением 1 кВ проводилось от конденсаторной батареи емкостью 10 мкФ. Индуктивность нагрузки была на уровне 1,6 мкГн. Коммутация батареи на генератор производилась взрывным замыкателем, встроенным в систему подрыва генератора.

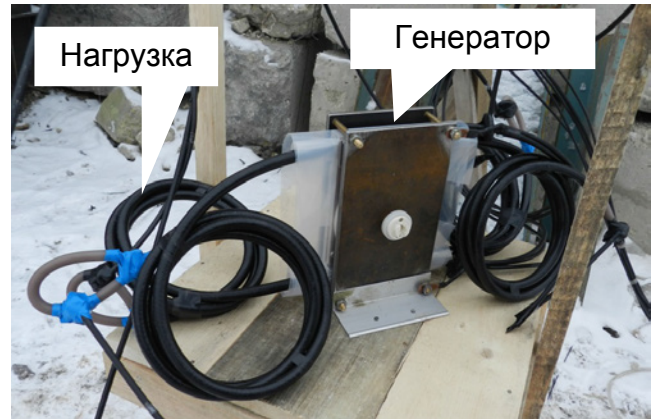


Рис. 5. Внешний вид СДМКГ

Запитка СДВМГ должна была начинаться за 4 мкс до начала движения лайнера на 8-й микросекунде. В действительности же, как видно из осциллограммы производной тока запитки на рис. 6, замыкатель начал срабатывать только на 11-й микросекунде и окончательно замкнул цепь на 14-й микросекунде. К этому времени начал двигаться лайнер, который на 12-й микросекунде замкнул полость сжатия генератора и оторвал его от батареи. Эксперимент показал, что для улучшения синхронизации запитки и начала движения лайнера необходим отдельный взрывной замыкатель, позволяющий регулировать момент коммутации.

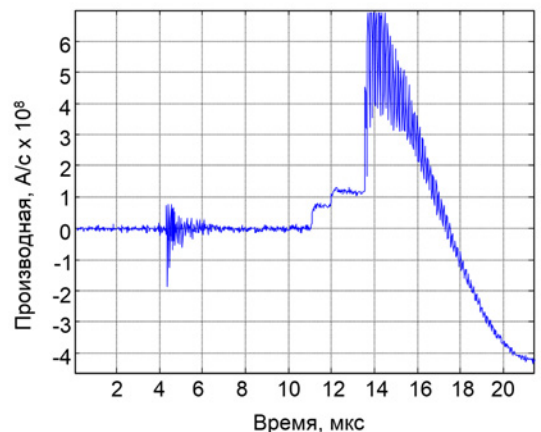


Рис. 6. Осциллограмма производной тока запитки

Таким образом, разработана конструкция автономного спирально-дискового магнитокумуля-

тивного генератора (СДМКГ) с питанием от постоянных магнитов, изготовленных из сплава неодим-железо-бор с остаточной намагниченностью 1,32 Тл. Для изготовления спирали генератора использовалась технология изготовления печатных плат из фольгированного текстолита. Это упрощает изготовление генератора. Выполнены численные расчеты по оптимизации конструкции СДМКГ. Расчеты показывают, что спирально-дисковый магнитокумулятивный генератор при своих достаточно компактных размерах (8×15×25 см) позволяет получать в индуктивной нагрузке до 200 Дж энергии.

### Список литературы

1. Гурин В. Е., Борискин А. С., Власов Ю. В. и др. Автономный магнитокумулятивный источник энергии на постоянных магнитах // Тезисы Международной конференции «VII Забабахинские

научные чтения». – Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005 г., с. 114.

2. Pavlovskiy A. I., Lyudaev R. Z., Boyko B. A. et al. Investigation of Disc Magnetocumulative Generators // Megagauss Fields and Pulsed Power Systems MG-V. Edited by V.M. Titov and G. A. Shvetsov – New-York: Nova Science Publishers, Inc. – 1995. – P. 331-336.

3. А.с. RU 2286003 С1 РФ, МПК H02N 11/00. Автономный магнитокумулятивный генератор / В. Е. Гурин, А. С. Пикарь, П. В. Королев, М. В. Климашов, Ю. М. Шибитов, А. С. Борискин, С. Н. Голосов. – 2005106171/06; Заявлено 05.03.2005; Оpubл. 20.10.2006, Бюл. № 29.

4. Pika A. C., Deryugin Yu. N., Korolev P. V., Klimashov M. V. Method of Computational Modeling of a Magnetic Flux Compression in Helical Magnetocumulative Generators // Megagauss-9. Proceedings of Ninth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Eds. V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. – Sarov: VNIIEF. – 2004. – P.578-582.